



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Bushing Trafo Menggunakan CST Studio Suite

Muhammad Reza Yogatama
NRP 221010205

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

Electric Field Distribution Analysis At Transformer Bushing Using CST Studio Suite

Muhammad Reza Yogatama
NRP 2210100205

Advisor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

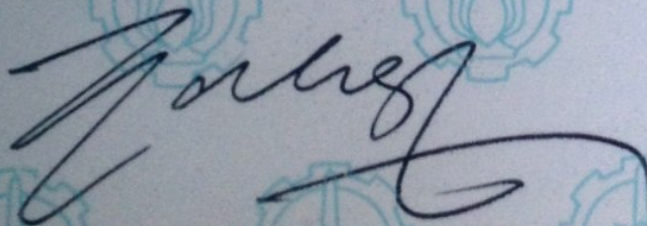
**ANALISIS DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK PADA
BUSHING TRAFO MENGGUNAKAN CST STUDIO
SUITE**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

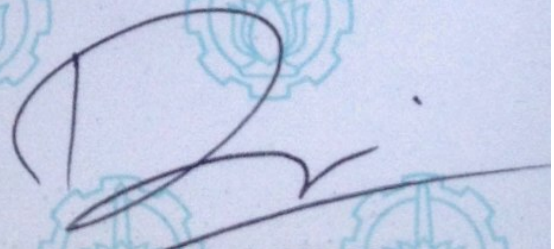
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Dosen Pembimbing II,



Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



ANALISIS DISTRIBUSI MEDAN LISTRIK PADA BUSHING TRAF0 MENGGUNAKAN CST STUDIO SUITE

Nama : Muhammad Reza Yogatama
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi ST.,MT.

ABSTRAK

Bushing Trafo adalah salah satu peralatan yang sering digunakan pada sistem transmisi dan distribusi. Bushing trafo ini berfungsi untuk mengikat konduktor pada badan trafo dan juga untuk mengisolir konduktor tersebut agar arus dan tegangan tidak mengalir pada badan pembungkus trafo. Isolator pada bushing juga berfungsi untuk menahan medan listrik yang menyebar dari konduktornya, sehingga tidak tercipta medan listrik yang besar pada trafo yang dapat berbahaya untuk lingkungan dan masyarakat disekitarnya.

Pada studi ini dilakukan analisis distribusi medan listrik pada bushing trafo bertipe kering dengan bahan isolasi porselen dan resin impregnated paper menggunakan simulasi berbasis FEM (Finite Element Method). Serta membandingkan kondisi medan listrik pada permukaan isolator pada bushing trafo dengan kondisi normal dan yang terkontaminasi air laut dan air murni dan juga menganalisis pengaruh dari besarnya butiran air kontaminan pada medan listrik di bushing trafo.

Kata Kunci : Finite Element Method, Medan Listrik, Bushing Trafo, Kontaminan Air Laut dan Air Murni

Halaman ini sengaja dikosongkan

ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION ANALYSIS AT TRANSFORMER BUSHING USING CST STUDIO SUITE

Name : Muhammad Reza Yogatama
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi ST., MT.

ABSTRACT

Transformer bushing is one of the tools that are commonly used in transmission and distribution systems. Transformer bushings serves to tie the conductor on the transformer and also to isolate the conductor so that the current and voltage are not flowing at the transformer body. Insulator bushings also serves to hold the electric field spreads from the conductor, so there is no large electric field is created around the transformer that can be harmful to the environment and society.

The study was done on the analysis of electric field distribution in transformer bushings type dry with a porcelain and resin impregnated paper based insulation simulation using FEM (Finite Element Method). As well as comparing the condition of the electric field at the surface of the insulator in transformer bushings with normal conditions and contaminated sea water and distilled water and also analyzed the influence of the droplet water contaminants on the electric field in transformer bushings.

Key Words : Finite Element Method, Electric Field, Transformer Bushing , Sea Water and Distilled Water Contaminant

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, dan sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **“Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Bushing Trafo Menggunakan CST Studio Suite”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua dan adik-adik penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
4. Teman-teman Angkatan 2010 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
5. Teman-teman Kalpataru yang telah mendukung penulis agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
6. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang memperbolehkan penulis menggunakan fasilitas lab.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
 BAB 2 PENGARUH KONTAMINAN TERHADAP MEDAN LISTRIK BUSHING TRAF0.....	 3
2.1 Bushing Trafo.....	3
2.2 Jenis Bushing Trafo.....	3
2.2.1 Klasifikasi Menurut Media Isolasi Pada Bagian Ujung Bushing	 4
2.2.2 Klasifikasi Menurut Konstruksi Bushing.....	4
2.2.3 Klasifikasi Menurut Isolasi Pada Bagian Dalam Bushing	 4
2.3 Solid Bushing	5
2.4 <i>Resin-Impregnated Paper</i> Bushing.....	5
2.5 Isolator Porselin.....	6
2.6 Konstruksi <i>Resin-Impregnated Paper</i> Bushing	6
2.7 CST Studio Suite	6
2.8 Pembentukan Sudut Kontak Pada Butir Air	8
2.9 Tingkat Polusi Isolator.....	10
 BAB 3 METODE DAN SIMULASI BUSHING TRAF0.....	 13
3.1 Metode Element Hingga (FEM)	13
3.2 Perhitungan Medan Listrik Pada Isolator Bushing Trafo	13
3.2.1 Energi Pada Medan Listrik.....	14

3.3 Perhitungan Medan Dengan Metode Elemen Hingga	15
3.4 Perhitungan Elemen Segitiga.....	16
3.4.1 Penyatuan Element Segitiga.....	17
3.5 Kontruksi dan Spesifikasi Bushing Trafo	18
3.6 Material Penyusun Bushing Trafo	20
3.7 Pemodelan Bushing Trafo Kedalam Bentuk Elemen Segitiga	21
3.8 Simulasi Sifat Hydrofobik Isolator Pada BushingTrafo	22
3.9 Pengaruh Sudut Kontak Butir Air Pada Medan Listrik Permukaan Isolator	22
3.10 Kontaminasi Air Laut Pada Permukaan Isolator	23
3.10.1 Perhitungan Luas Permukaan Isolator	24
 BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA	27
4.1 Tegangan Kerja Bushing Trafo	27
4.2 Arah Distribusi Medan Listrik Bushing Trafo.....	27
4.3 Pengaruh Pembentukan Sudut Pada Butir Air Terhadap Medan Listrik.....	28
4.4 Perbandingan Medan Listrik pada Bagian Bushing Trafo pada Kondisi Normal dengan Kondisi Terkontaminan Air Laut dan Air Murni (<i>Distilled Water</i>).....	31
4.4.1 Perbandingan Medan Listrik pada Batang Inti (<i>Core Rod</i>).....	31
4.4.2 Perbandingan Medan Listrik Pada Permukaan <i>Resin-Impregnated Paper</i>	36
4.4.3 Perbandingan Medan Listrik Pada Sirip Pertama Isolator Porselen	43
4.4.4 Perbandingan Medan Listrik Pada Sirip Pertama dengan Perbedaan Sudut Kontak Butir Air.....	52
 BAB 5 PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
 DAFTAR PUSTAKA	55
RIWAYAT HIDUP	57

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Isolator Porselin.....	6
Gambar 2.2 Kontruksi bushing trafo	8
Gambar 2.3 Pembentukan sudut kotak pada permukaan isolator	9
Gambar 3.1 Element segitiga pada suatu domain.....	16
Gambar 3.2 Penggabungan dua element segitiga.....	18
Gambar 3.3 Kontruksi bushing trafo tipe <i>Resin Impregnated Paper</i>	19
Gambar 3.5 Pemodelan elemen segitiga pada bushing trafo	21
Gambar 3.6 Sudut kontak ($30^\circ < \theta < 90^\circ$) (a), sudut kontak ($0 < \theta < 30^\circ$) (b)	22
Gambar 3.7 Pertemuan 3 dielektrik pada permukaan isolator bushing.	23
Gambar 4.1 Tegangan kerja bushing.....	27
Gambar 4.2 Arah distribusi medan bushing	28
Gambar 4.3 Pengaruh sudut kontak terhadap nilai medan listrik dengan sudut kontak 90° (a), sudut kontak 20° (b)	29
Gambar 4.4 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 1 air laut	32
Gambar 4.5 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 2 air laut	33
Gambar 4.6 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan air murni (<i>distilled water</i>) dengan (a) sudut kontaminan 1 dan (b) sudut kontaminan 2	34
Gambar 4.7 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti (<i>core rod</i>).....	36
Gambar 4.8 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan <i>resin impregnated paper</i> dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 1 air laut	38
Gambar 4.9 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan <i>resin impregnated paper</i> dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 2 air laut	39

Gambar 4.10	Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan <i>resin impregnated paper</i> dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 1 air murni.....	40
Gambar 4.11	Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan <i>resin impregnated paper</i> dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 2 air murni.....	41
Gambar 4.12	Perbandingan kondisi medan listrik di permukaan <i>resin impregnated paper</i>	42
Gambar 4.13	Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 1 air laut pada sirip pertama isolator	44
Gambar 4.14	Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 2 air laut pada sirip pertama isolator	46
Gambar 4.15	Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 1 air murni pada sirip pertama isolator	48
Gambar 4.16	Perbandingan kondisi medan listrik pada kondisi normal dan terdapat kontaminan 2 air murni pada sirip pertama isolator	50
Gambar 4.17	Perbandingan kondisi medan listrik di sirip pertama isolator.....	51
Gambar 4.18	Perbandingan kondisi medan listrik pada sirip pertama isolator bushing trafo dengan perubahan sudut kontak butir air kontaminan	52
Gambar 4.17	Perbesaran kurva pada jarak 20-30 mm.....	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Tingkat Polusi Dilihat dari Aspek Lingkungan Berdasarkan IEC 815 10
Tabel 2.2	Tingkat Polusi ESDD berdasarkan standart IEC 815 : 1986 ... 10
Tabel 2.3	Nilai Faktor Korelasi berdasarkan IEC 507 : 1991..... 11
Tabel 3.1	Spesifikasi Bushing Trafo Tipe <i>Resin-Impregnated Paper</i> 19
Tabel 3.2	Data sheet material isolator..... 20
Tabel 3.3	Jumlah elemen segitiga yang terbentuk untuk setiap parameter simulasi..... 21

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bushing merupakan sebuah pengikat padu yang berfungsi mengikat konduktor ke badan peralatan dan mengisolir konduktor tersebut dengan badan peralatan yang dikebumikan [1]. Peralatan yang digunakan dalam studi ini adalah trafo. Bagian utama dari suatu bushing adalah inti atau konduktor, bahan dielektrik dan flans yang terbuat dari logam. Fungsi inti adalah menyalurkan arus dari bagian dalam peralatan ke terminal luar dan bekerja pada tegangan tinggi. Dengan bantuan flans, isolator diikatkan pada badan peralatan yang dibumikan [1]. Dengan demikian dibutuhkan desain yang baik agar konduktor pada bushing dapat mengalirkan arus dan isolasi pada bushing mampu mengisolasi tegangan agar tangki trafo serta lingkungan di sekitar trafo tidak bertegangan dan aman.

Dikarenakan bekerja pada tegangan tinggi maka dibutuhkan isolasi yang baik pada bushing trafo.. Pada studi ini akan dilakukan permodelan bushing dengan tipe isolasi berbahan *resin impregnated paper* karena bahan resin memiliki kemampuan dielektrik isolasi yang lebih baik dibandingkan dengan kertas isolasi berbahan minyak (*oil impregnated paper*).

Selain bahan isolasi, kemampuan dielektrik isolasi pada bushing juga dipengaruhi oleh tingkat kontaminan dan kondisi permukaan isolator tersebut. Kontaminan yang menempel pada permukaan isolator dapat menyebabkan kerusakan isolasi yang diakibatkan oleh medan listrik yang biasa disebut dengan kerusakan elektromekanik [2]. Semakin berat tingkat kontaminan yang menempel, maka akan sangat mempengaruhi nilai medan listrik pada isolator itu sendiri. Nilai medan listrik juga akan berubah ketika terjadi kerusakan atau terdapat rongga udara pada permukaan isolator tersebut.

Pada studi ini, akan dilakukan analisis menggunakan simulasi berbasis *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis distribusi medan pada bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper*. Serta membandingkan kondisi medan listrik pada permukaan isolator pada bushing yang terkontaminasi air laut dengan kondisi normal. Dan membandingkan kondisi medan listrik pada saat terdapat kerusakan

pada isolator tersebut dengan kondisi permukaan isolator yang masih baik.

Dari permasalahan tersebut, pada studi ini dapat dirumuskan beberapa masalah yang akan dibahas. Permasalahan pertama adalah menganalisis distribusi medan listrik pada bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper*. Permasalahan kedua adalah pengaruh sudut kotak butiran kontaminan air laut terhadap kondisi medan listrik isolator bushing trafo.

Studi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi medan listrik saat terjadi pembentukan sudut kotak menganalisis kondisi medan listrik pada bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper*. Serta membandingkan kondisi medan listrik saat terkena kontaminan air laut dengan kondisi normal dan membandingkan medan listrik saat terdapat kerusakan pada permukaan isolator pada bushing.

1.2 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Studi ini dibagi menjadi lima bab.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang meliputi pembahasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

Bab kedua membahas tentang teori dasar yang digunakan dalam pengerjaan studi ini, yaitu jenis-jenis bushing trafo dan kontaminan air garam.

Bab ketiga akan dibahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini. Antara lain, metode *Finite Element Method*, *Equivalent Salt Deposit Density* dan pembentukan sudut kontak pada butir air yang menempel pada permukaan isolator bushing trafo. Serta dilampirkan *data sheet* konstruksi dan material bushing trafo.

Bab keempat akan memaparkan hasil simulasi dan menganalisis hasil tersebut, sehingga dapat diketahui karakteristik medan pada bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper*. Serta mengetahui pengaruh kontaminan dengan kandungan air garam dan tak mengandung garam terhadap nilai medan listrik isolator.

Bab kelima berisi kesimpulan dari hasil simulasi bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper* dan saran

BAB II

Pengaruh Kontaminan Terhadap Medan Listrik Bushing Trafo

2.1 Bushing Trafo

Bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator sebagai alat penghubung antara kumparan pada trafo dan jaringan luar. Pada dasarnya tujuan utama dari bushing adalah untuk menyalurkan daya elektrik keluar dan masuk dari wadah dari sebuah peralatan elektrik seperti trafo, *circuit breakers*, reactor shunt dan juga kapasitor daya [3]. Konduktor bushing biasanya dapat berbentuk konduktor yang menjadi satu bagian dengan bushing atau bisa juga terpisah dengan bushing sebagai konduktor terpisah yang diletakkan pada tengah bushing. Sejak daya adalah hasil dari perkalian tegangan dan arus maka isolasi pada bushing harus mampu menahan besar tegangan yang terpasang dan juga konduktor pada bushing harus mampu membawa arus sesuai dengan *carrying capacity* tanpa terjadi *overheat* pada isolasi [3]. Isolator pada bushing sampai pada tegangan 30 KV dibuat dari porselen atau damar tuang, untuk tegangan yang lebih tinggi bahan isolasi yang lebih sering digunakan adalah minyak trafo, hardboard atau softpaper dan kombinasi dielektrik cair dan padat kemudian dibungkus dengan kerangka porselen [1]. Isolator pada bushing dikatakan baik apabila isolator tersebut memiliki kekuatan dielektrik sehingga dapat menahan beban potensial listrik dan medan listrik yang mengenainya tanpa menjadikan cacat atau rusak. Tetapi kondisi suhu, kontaminasi dan kondisi fisik isolator tersebut dapat mempengaruhi kemampuan dielektrik isolator.

Fungsi utama bushing trafo adalah :

1. Untuk menghubungkan antara kumparan pada trafo dan jaringan.
2. Untuk mengisolasi agar tegangan tetap berada pada inti konduktor.
3. Untuk menjaga agar wadah (*enclosure*) tidak bertegangan.

2.2 Jenis Bushing Trafo [3]

Terdapat banyak metode untuk mengklasifikasikan jenis bushing. Jika diklasifikasikan menurut praktiknya di lapangan, bushing dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Media isolasi pada bagian bawah bushing
2. Konstruksi bushing
3. Media isolasi pada bagian dalam bushing

2.2.1 Klasifikasi Menurut Media Isolasi Pada Bagian Ujung Bushing

Terdapat beberapa jenis metode untuk media isolasi yang terdapat pada ujung dari bushing. Metode *air to oil* bushing memiliki isolasi udara di salah satu ujung bushing dan isolasi minyak di ujung yang lain [3]. Karena minyak lebih kuat secara dielektrik dibandingkan daripada udara di kondisi atmosfer bertekanan, bagian ujung yang berisi minyak hampir 2 kali lebih panjang daripada bagian yang menggunakan isolasi udara. Biasa digunakan pada bushing yang dipasang pada peralatan yang menggunakan minyak. Metode *air to air* memiliki isolasi udara di kedua ujungnya dan biasanya digunakan di tempat bergedung dimana salah satu ujungnya terdapat di kondisi luar ruang dan ujung yang lain berada di kondisi dalam ruangan.

2.2.2 Klasifikasi Menurut Konstruksi Bushing

Terdapat dua tipe utama pada konstruksi bushing, solid dan kapasitansi bertingkat atau condenser. Pada tipe solid bushing konstruksi utamanya adalah konduktor yang terdapat pada bagian tengah dan porcelain atau epoxy resin sebagai isolator dan utamanya digunakan pada tegangan yang rendah dibawah 25 kV. Konstruksi pada tipe ini lebih sederhana bila dibandingkan dengan tipe kapasitansi bertingkat. Pada tipe kapasitansi bertingkat atau condenser bagian utamanya adalah konduktor pada bagian tengah dimana inti kapasitansi bertingkat akan dibelitkan dan isolator pada bagian atas dan bawah. Kapasitansi bertingkat dibuat dengan metode berlapis dengan jarak yang ditentukan.

2.2.3 Klasifikasi Menurut Isolasi Pada Bagian Dalam Bushing [3]

Terdapat beberapa material yang dapat digunakan sebagai bahan isolasi pada bagian dalam bushing. Umumnya material ini dapat digunakan baik pada tipe konstruksi solid maupun kapasitansi bertingkat. Dan di beberapa tipe digunakan beberapa material sebagai isolasi.

1. *Air-Insulated Bushing*
2. *Oil-Insulated Bushing*
3. *Oil-Impregnated Paper –Insulated Bushing*
4. *Resin-Impregnated Paper-Insulated Bushing*
5. *Cast –Insulation Bushing*
6. *Gas – Insulated Bushing*

2.3 Solid Bushing [3]

Bushing dengan tipe solid terbuat dengan konduktor yang berada tepat di tengah dan isolator porselen atau epoxy di kedua ujung dari bushing. Tegangan yang digunakan pada bushing tipe ini biasanya adalah tegangan yang lebih rendah sampai dengan 25kV. Secara umum kontruksi tipe ini lebih sederhana bila dibandingkan dengan tipe kapasitansi bertingkat. Solid bushing biasanya banyak digunakan mulai dari trafo distribusi yang kecil, sampai step-up trafo pada generator dan generator daya dengan pendingin hydrogen.

Pada bagian ujung bawah, konduktor yang berbentuk kawat dengan diameter yang kecil langsung terhubung dengan belitan trafo. Ukuran kawat bisa berubah tergantung dari besarnya arus pada bushing. Semakin besar diameter dari kawat konduktor maka semakin besar arus yang akan dilewatkan pada bushing. Kawat konduktor ini biasanya terbuat dari tembaga yang berbentuk pejal.

Diantara dua bagian isolator terdapat flange yang terpasang pada bagian luar trafo. Isolator yang digunakan dapat terdiri dari beberapa material. Celah diantara konduktor dan isolator dapat diisi oleh udara tetapi pada beberapa jenis dapat diisi dengan foam maupun gel.

2.4 Resin-Impregnated Paper Bushing [4]

Resin impregnated paper adalah bahan baru yang digunakan sebagai bahan isolasi dengan kemampuan ketahanan terhadap panas yang lebih tinggi. Bahan *resin impregnated paper* adalah bahan isolasi yang terbuat dari kertas kraft yang diisikan dengan epoxy resin.

Perbedaan utama antara *resin impregnated paper* bushing apabila dibandingkan dengan *oil impregnated paper* bushing yang umum digunakan adalah pada *oil impregnated paper* bushing diisikan dengan menggunakan minyak trafo dimana terdapat bagian yang masih menggunakan isolasi cair sedangkan pada *resin impregnated paper* bushing epoxy resin diisikan langsung pada kertas kraft sehingga membentuk isolasi yang padat.

Keunggulan dari *resin impregnated paper* bushing adalah memiliki kelas isolasi E dan dengan ketahanan terhadap panasnya sampai dengan 120 °C. *Resin impregnated paper* bushing juga lebih ringan 50 % apabila dibandingkan dengan *oil impregnated paper* bushing. Dari segi pemasangan *resin impregnated paper* bushing dapat dipasang secara vertical maupun horizontal pada sudut berapapun. *Resin impregnated paper* bushing juga tidak menggunakan bahan isolasi minyak sehingga

tidak berpotensi terbakar dan menimbulkan ledakan yang dapat dipicu oleh kegagalan isolasi dan arcing.

2.5 Isolator Porselin

Isolator porselin dibuat dari bahan campuran tanah porselin, kwarts, dan veld spaat, yang bagian luarnya dilapisi dengan bahan glazuur agar bahan isolator tersebut tidak berpori-pori. Isolator porselin memiliki sifat tidak menghantar (*non conducting*) listrik yang tinggi, dan memiliki kekuatan mekanis yang besar.

Kekurangan dari bahan isolator ini adalah ukuran isolator porselin tidak dapat diperbesar, karena pada saat pembuatannya terjadi penyusutan bahan. Dari segi ekonomis, isolator ini lebih mahal dari pada jenis yang lain dikarenakan bahan materialnya. Maka dari itu, untuk menjaga keandalan dari isolator ini, dibuat rongga di dalamnya yang kemudian akan di isi dengan bahan besi atau baja tempaan sehingga kekuatan mekanis isolator porselin dapat bertambah.



Gambar 2.1 Isolator Porselin

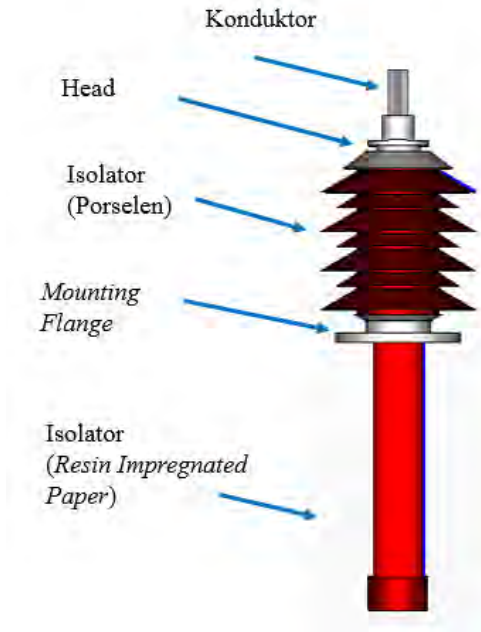
2.6 Kontruksi *Resin Impregnated Paper Bushing*

Resin Impregnated Paper Bushing memiliki konstruksi yang dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. *Head*

Head merupakan bagian pada bushing trafo yang berfungsi sebagai penghubung yang terpasang dengan jaringan atau jala jala sekaligus sebagai pelindung dari konduktor yang terletak di tengah. Head terbuat dari bahan aluminium.

2. Konduktor
Konduktor berfungsi menghantarkan potensial listrik dari jala-jala atau jaringan ke belitan trafo. Konduktor berbentuk kawat yang diameternya tergantung besarnya arus. Semakin besar arus yang dihantarkan maka semakin besar diameter dari kawat konduktor. Konduktor terbuat dari kawat tembaga yang berbentuk pejal.
3. Isolator Bagian Atas
Bagian isolator terbuat dari bahan porselin yang berfungsi untuk membungkus konduktor dan melindungi dari kontaminan luar seperti air, debu atau pasir. Bagian isolator di desain bersirip-sirip agar medan listrik yang mengalir pada isolator dapat disebar. Juga berfungsi untuk mengisolasi potensial listrik yang berada pada konduktor agar tidak terhantar pada peralatan yang terhubung dengan bushing
4. Flange
Flange memiliki dua fungsi utama yaitu untuk menempelkan bushing pada peralatan dan juga menahan isolator agar tidak lepas. Flange terbuat dari bahan plat alumunium ataupun baja.
5. Isolator Bagian Bawah
Bagian isolator terbuat dari bahan *resin impregnated paper* yang dibentuk dari kertas kraft yang diisi dengan epoxy resin. Yang berfungsi untuk mengisolasi medan listrik dan potensial listrik yang mengalir pada konduktor sehingga tidak terhantar pada peralatan yang dihubungkan pada bushing.



Gambar 2.2 kontruksi bushing trafo

2.7 CST Studio Suite

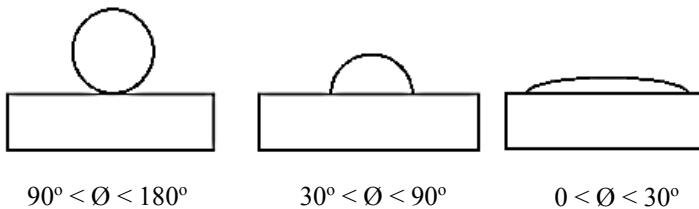
Pada tugas akhir ini menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2011 yang digunakan untuk membuat desain bushing trafo secara keseluruhan, mensimulasikan pembentukan *mesh* bushing trafo, mensimulasikan serta menghitung tegangan dan medan listrik pada bushing trafo menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Fitur yang disajikan pada perangkat lunak ini memudahkan dalam analisis medan listrik.

2.8 Pembentukan Sudut Kontak Pada Butir Air

Sudut kontak (θ) merupakan sudut yang terbentuk antara permukaan isolator dengan air yang berada pada permukaan isolator. Besar sudut kontak yang terbentuk mempengaruhi sifat hydrofobik bahan isolator. Sifat hydrofobik merupakan suatu sifat menolak air dalam keadaan terpolusi.

Pembentukan sudut kontak pada permukaan isolator dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu :

1. Bahan yang bersifat basah (*Hydrophilic*)
Memiliki sudut kontak butir air dengan permukaan isolator kurang dari 30 derajat.
2. Bahan yang bersifat basah sebagian (*Partially Wetted*)
Memiliki sudut kontak butir air dengan permukaan isolator pada interval 30 s/d 89 derajat.
3. Bahan yang bersifat tidak basah (*Hydrophobicity*)
Memiliki sudut kontak butir air dengan permukaan isolator lebih besar dari 90 derajat.



Gambar 2.3 Pembentukan sudut kontak pada permukaan Isolator

2.9 Tingkat Polusi Isolator [5]

Menurut standar IEC 815, bobot polusi isolator ditetapkan menjadi empat, yaitu ringan, sedang, berat dan sangat berat. Metode umum yang digunakan untuk menentukan tingkat polusi adalah metode ESDD (*Equivalent Salt Density Deposit*) dan metode tinjauan lapangan.

Penentuan tingkat polusi isolator berdasarkan metode tinjauan lapangan ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tingkat Polusi Dilihat dari Aspek Lingkungan Berdasarkan IEC 815

Tingkat Polusi	Contoh Lingkungan
Ringan	1. Daerah dengan sedikit industri dan rumah penduduk dengan sarana pembakaran rendah. 2. Daerah pertanian dan pegunungan (Penggunaan pupuk dapat meningkatkan bobot polusi) (Daerah- daerah diatas terletak 10 km atau lebih dari laut dan angin laut tidak berhembus atau terpapar langsung)
Sedang	1. Daerah industri yang tidak menghasilkan polusi gas. 2. Daerah industri atau pemukiman yang tingkat memiliki tingkat curah hujan tinggi. 3. Daerah yang tidak terlalu dekat dengan pantai.
Berat	1. Daerah industri dan perkotaan dengan sarana pembakaran tinggi. 2. Daerah dekat dengan laut dan terpapar angin laut secara langsung.
Sangat Berat	1. Daerah pantai dan terkena air laut 2. Daerah gurun atau padang pasir.

Penentuan tingkat polusi isolator pada metode ESDD (*Equivalent Salt Density Deposit*) berdasarkan standart IEC 815 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tingkat Polusi ESDD berdasarkan standart IEC 815 : 1986

Tingkat Polusi	ESDD Maksimum (mg/cm ³)
Ringan	0.03 - 0.06
Sedang	0.01 - 0.2
Berat	0.3 - 0.6
Sangat Berat	> 0.80

Faktor koreksi b pada suhu antara 5 – 30°C yang digunakan dalam perhitungan berdasarkan IEC 507 : 1991

Tabel 2.3 Nilai Faktor Korelasi berdasarkan IEC 507 : 1991

θ (°C)	b
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

Untuk nilai θ yang lain pada suhu 5 – 30°C dapat dicari dengan interpolasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE DAN SIMULASI BUSHING TRAF0

3.1 Metode Elemen Hingga (FEM)

Dalam mensimulasikan distribusi medan listrik pada bushing trafo menggunakan CST Studio Suit, metode dasar yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga atau FEM (*Finite Element Method*). Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah proses diskretisasi. Dalam proses diskretisasi, untuk memodelkan bentuk satu, dua atau tiga dimensi suatu benda atau daerah yang dianalisis dibagi kedalam bentuk mesh (kumpulan elemen) yang saling terhubung.

Analisis penyelesaian FEM dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

1. Analisis struktur
Analisis struktur digunakan untuk menganalisis tegangan pada struktur rangka, getaran, *bucking*.
2. Analisis non-struktur.
Analisis non-struktur digunakan untuk menganalisis kejadian transfer panas, aliran fluida, distribusi dari potensial medan magnet dan medan listrik.

Dalam tugas akhir ini digunakan analisis non struktur untuk mensimulasikan distribusi medan listrik pada busung trafo.

3.2 Perhitungan Medan Listrik pada Isolator Bushing Trafo

Medan listrik adalah daerah yang masih dipengaruhi sifat kelistrikan dari suatu muatan. Perubahan nilai medan listrik pada isolator di bushing trafo dapat mempengaruhi nilai arus bocor (*leakage current*) dan tegangan tembus (*Breakdown*). Medan listrik dapat muncul karena adanya gaya (F) yang bertumpu pada suatu muatan listrik.

$$F_t = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_t}{R_{1t}^2} a_{1t} \quad (3.1)$$

Bila gaya tersebut bertumpu pada suatu muatan, maka :

$$\frac{F_t}{q_t} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{1t}^2} a_{1t} \quad (3.2)$$

Sehingga,

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t} \quad (3.3)$$

Apabila diketahui nilai potensial listrik (V), maka medan listrik juga dapat dihitung melalui gradiennya :

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y + \frac{\partial V}{\partial z} a_z \quad (3.4)$$

Sehingga didapatkan nilai E :

$$E = -\nabla V \quad (3.5)$$

3.2.1 Energi Pada Medan Listrik [6]

Pada distribusi medan listrik terdapat muatan energi (W_E) yang tersimpan, energi tersebut dapat dihitung menggunakan rumus :

$$W_E = \frac{1}{2} \int_{Vol} \rho_v V dv \quad (3.6)$$

Persamaan diatas merupakan perhitungan energi potensial total pada suatu muatan titik atau bidang.

Keterangan :

ρ_v = Kerapatan volume dengan medan potensial (C/m^3)

V = Potensial Listrik pada titik

Total energi (W_E) pada medan potensial dalam suatu volume adalah :

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V \epsilon (\nabla V)^2 dv \quad (3.7)$$

3.3 Perhitungan Medan Dengan Metode Elemen Hingga [6]

Nilai potensial listrik (V) juga berhubungan erat dengan kerapatan flux listrik (D). Dengan menggunakan persamaan Maxwell, dapat diketahui hubungan nilai potensial listrik dengan kerapatan flux.

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (3.8)$$

Hubungan D dan E,

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.9)$$

Bila polarisasi dianggap nol, diperoleh persamaan,

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

Keterangan :

E = Intensitas Medan Listrik (V/m)

V = Potensial Listrik (V)

D = Kerapatan Fluks Listrik (C/m²)

Gradien potensial pada persamaan *Poisson* 3.8 dapat diuraikan menjadi persamaan berikut :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

Bila ρ_v sama dengan nol, dengan kondisi muatan titik dan kerapatan muatan permukaan digunakan sebagai kondisi batas dan sumber medan, maka :

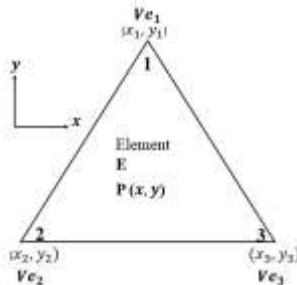
$$\nabla \cdot \nabla V = 0 \quad (3.12)$$

Persamaan 3.12 merupakan persamaan *Laplace*. Dan bila dirumuskan dalam koordinat kartesius, maka bentuk persamaan *Laplace* adalah :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = 0 \quad (3.13)$$

3.4 Perhitungan Elemen Segitiga

Dalam menyelesaikan perhitungan distribusi medan listrik menggunakan metode elemen hingga, bushing trafo dibagi kedalam bentuk elemen segitiga. Dengan memperkirakan potensial listrik (V) pada tiap elemen segitiga, maka akan diketahui nilai distribusi medan pada bushing trafo. Nilai potensial listrik terletak pada titik yang terdapat pada tiap sudut segitiga. Setelah nilai potensial listrik pada setiap elemen segitiga diketahui. Lalu tiap elemen segitiga dihubungkan dengan segitiga yang lain dengan bentuk dan dimensi yang berbeda. Sehingga akan didapatkan nilai potensial listrik pada tiap-tiap titik pada bushing trafo.



Gambar 3.1 Element segitiga pada suatu domain

Fungsi V pada titik $P(x,y)$ pada elemen segitiga diaplikasikan dalam bentuk persamaan liner :

$$V = a + bx + cy \quad (3.14)$$

Karena $i, i1$ dan $i2$ adalah permutasi dari 1, 2, dan 3, maka didapatkan persamaan :

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i \alpha_i(x, y) \quad (3.15)$$

Energi yang berada pada tiap sudut sebuah segitiga dengan gradien potensial listrik dapat dirumuskan menjadi :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int |\nabla V|^2 ds \quad (3.16)$$

Sehingga nilai energinya menjadi :

$$W_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 V_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds V_j \quad (3.17)$$

Dengan S_{ij} merupakan matriks pada sebuah elemen segitiga :

$$S_{i,j} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds \quad (3.18)$$

Persamaan 3.5 dapat ditulis sebagai metriks kuadrat dalam bentuk energi :

$$W_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r V^t S V \quad (3.19)$$

Keterangan :

W_E = Energi pada medan elektrostatis

ε_r = Permittivitas relatif

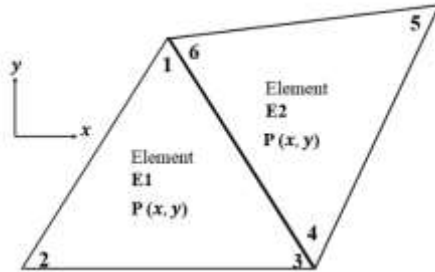
ε_0 = Permittivitas ruang hampa = $8,854 \times 10^{-12}$

V = Matriks dari potensial listrik pada titik V_{e1} , V_{e2} , dan V_{e3}

T = Transpose matriks V

3.4.1 Penyatuan Element Segitiga

Setelah bushing trafo didiskretisasi menjadi bentuk elemen segitiga, maka dapat dilakukan perhitungan potensial listrik pada seluruh bagian isolator dengan menggabungkan tiap-tiap elemen segitiga menjadi satu dimensi yang utuh. Dari nilai potensial listrik pada setiap penggabungan elemen segitiga, dapat diketahui nilai medan listrik (E), kerapatan fluks (D) dan energi (W) pada isolator.



Gambar 3.2 Hasil penggabungan dua element segitiga

Energi pada element yang saling terhubung adalah :

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r V_{con}^T S V_{con} \quad (3.20)$$

Dengan

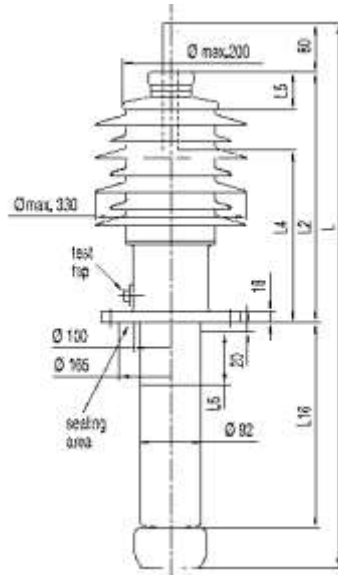
$$S = C^T S_{dis} C \quad (3.21)$$

Persamaan 3.21 merupakan matriks koefisien dari segitiga yang saling terhubung. Matriks koefisiensi dari penggabungan dua element segitiga seperti pada gambar 3.2 adalah :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{66}^{(2)} & S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{13}^{(1)} & S_{65}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} + S_{46}^{(2)} & S_{22}^{(1)} + S_{44}^{(2)} & S_{23}^{(1)} & S_{45}^{(2)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} & 0 \\ S_{56}^{(1)} & S_{54}^{(1)} & 0 & S_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.5 Kontruksi dan Spesifikasi Bushing Trafo

Dalam tugas akhir ini, bushing trafo yang disimulasikan adalah bushing trafo tipe kering dengan resin impregnated paper sebagai bahan isolasi dengan rating tegangan nominal 24 kV sesuai standart ANSI C57.19. Kontuksi bushing yang disimulasikan ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.3 Kontruksi Bushing Trafo tipe *Resin Impregnated Paper*

Bushing trafo yang disimulasikan adalah tipe *Resin Impregnated Paper* (ANSI C57.19) yang digunakan pada tegangan 24 KV, dengan tujuh sirip isolator berbahan porselen sebagai media penyebaran medan. Untuk spesifikasi bushing trafo ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi bushing trafo tipe *resin impregnated paper*

Specification		UNIT	
Voltage Class		kV	24
Creepage Distance		mm	745
Dry Arcing Distance		mm	255
BIL 12/50 μ s		kV	150
Low Frequency Flashover	Dry	kV	60
	Wet	kV	50

3.6 Material Penyusun Bushing Trafo

Material atau bahan yang digunakan untuk mensimulasikan bushing trafo berdasarkan pada data *library* CST Studio Suit.

Tabel 3.2 Data sheet material isolator

No.	Unit	Material				
		Aluminium	Copper	Porcelain	Sillicon (Loss Free)	Resin Impregnated paper
1	Epsilon	1	1	6	11.9	5
2	Mue	1	1	1	1	1
3	El. Conductivity	3.56×10^7	5.8×10^7	1×10^{-15}		0.01
4	Rho	2700	8930	2400	2330	1390
5	Therm. Conductivity	237	401	2	148	0.15
6	Heat Capacity	0,9	0.39	1.1	0.7	1.4
7	Diffusivity	9.753×10^{-5}	0.000115	7.575×10^{-7}	9.047×10^{-5}	7.708×10^{-8}
8	Young's Mod	69	120	104	112	
9	Poiss Ratio	0.33	0.33	0.3	0.28	
10	Thermal Exp.	23	17	4.9	5.1	

3.7 Pemodelan Bushing Trafo Kedalam Bentuk Elemen Segitiga

Untuk menghitung nilai distribusi medan listrik pada seluruh bagian isolator, isolator dimodelkan kedalam bentuk elemen segitiga (*Tetrahedral Mesh*). Untuk tiap parameter yang disimulasikan, jumlah elemen segitiga yang terbentuk tidak sama. Pada tabel 3.3 menunjukkan jumlah elemen segitiga pada tiap parameter yang disimulasikan.

Tabel 3.3 Jumlah elemen segitiga yang terbentuk untuk setiap parameter simulasi

Bahan Isolator	Parameter	Element Segitiga
Porselen	Normal	74558
	Butir Air Laut	86651
	Peluasan Butir Air Laut	84985
	Butir Air Murni (<i>Distilled Water</i>)	86651
	Peluasan Butit Air Murni (<i>Distilled Water</i>)	85309



Gambar 3.5 Pemodelan elemen segitiga pada bushing trafo

3.8 Simulasi Sifat Hydrofobik Isolator pada Bushing Trafo

Sudut kontak pada butiran air yang mengenai permukaan isolator berpengaruh pada kemampuan dielektrik isolator untuk menahan kuat medan listrik yang mengenainya. Untuk melihat pengaruh besar sudut kontak butir air terhadap medan listrik, akan dilakukan pensimulasian sifat hydrofobik pada sirip pertama isolator dengan menggunakan air garam dan air murni (*distilled water*) sebagai kontaminan.

Ada dua kondisi yang akan digunakan, yaitu :

1. Kondisi basah keseluruhan
Pada kondisi ini, butiran air memiliki sudut kontak kurang dari 30° ($0 < \theta < 30^\circ$) dengan sudut yang digunakan sebesar 20°
2. Kondisi basah sebagian
Pada kondisi ini, butiran air memiliki sudut kontak pada interval 30° s/d 89° ($30^\circ < \theta < 90^\circ$) dengan sudut yang digunakan sebesar 90°



(a)



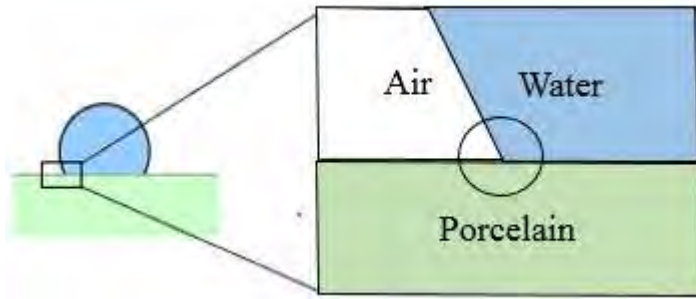
(b)

Gambar 3.6 Sudut kontak 20° (a), sudut kontak 90° (b)

3.9 Pengaruh Sudut Kontak Butir Air Pada Medan Listrik Permukaan Isolator [7]

Pada studi ini membahas mengenai medan listrik di sepanjang sirip isolator bushing dengan kondisi terdapat kontaminan berupa butiran air di sepanjang sirip tersebut. Dalam kondisi ini perhitungan medan listrik secara teoritis menggunakan persamaan Maxwell tidak dimungkinkan.

Butiran air menyebabkan sebuah titik pada permukaan dimana tiga dielektrik yang berbeda (udara, air dan porselen) bertemu. Pertemuan tiga dielektrik yang menjadi satu ini menyebabkan medan listrik pada titik ini meningkat menuju tak hingga.



Gambar 3.7 Pertemuan 3 dielektrik pada permukaan isolator bushing

3.10 Kontaminasi Air Laut Pada Permukaan Isolator

Perhitungan ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) diperlukan untuk mengetahui tingkat polutan yang menempel pada permukaan isolator.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (3.24)$$

Keterangan :

σ_{θ} = Konduktifitas pada Suhu θ

σ_{20} = Konduktifitas pada Suhu 20°C

b = Faktor Koreksi pada Suhu θ (IEC 507)

θ = Suhu Larutan

Setelah konduktifitas pada suhu 20°C didapatkan, salinasi (S_a) dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$S_a = (5.7 \times \sigma_{20})^{1.03} \quad (3.25)$$

Dari persamaan 3.25, maka nilai ESDD dapat diketahui :

$$ESDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (3.26)$$

Keterangan :

V = Volume air (ml)

A = Luas Isolator yang dikenai kontaminan (cm²)

S_a = Salinasi garam (ppt)

3.10.1 Perhitungan ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)

Dari data material air garam pada *library* CST Studio Suit, diketahui nilai konduktifiti elektrik $\sigma_{25} = 3.53$ S/m. Untuk menghitung nilai konduktifity elektrik pada suhu 20°C (σ_{20}) (IEC 507), maka nilai faktor koreksi b dapat dihitung menggunakan interpolasi :

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (3.33)$$

Bila koordinat yang digunakan adalah (b, θ_{25}) , (b_{20}, θ_{20}) dan (b_{30}, θ_{30}) maka :

$$b = b_{20} + (b_{30} - b_{20}) \frac{\theta_{25} - \theta_{20}}{\theta_{30} - \theta_{20}}$$

$$b = 0.0227 + (0.01905 \times 0.02277) \times \frac{25 - 20}{30 - 20}$$

$$b = 0.02091$$

Dengan menggunakan persamaan 3.24, maka nilai konduktifity pada suhu 20°C (σ_{20}) adalah :

$$\sigma_{20} = 3.53 \times [1 - 0.02091(25 - 20)]$$

$$\sigma_{20} = 3.161 \text{ S/cm}$$

Setelah diketahui nilai S_a dan b , maka salinasi polutan garam S_a dapat dihitung dengan persamaan 3.25 :

$$S_a = (5.7 \times 3.161)^{1.03}$$

$$S_a = 19.65 \text{ ppt}$$

Setelah mengetahui seluruh parameter, maka Nilai ESDD yaitu :

$$ESDD = \frac{19.65}{52.584}$$

$$ESDD = 0.3736 \text{ mg/cm}^2$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

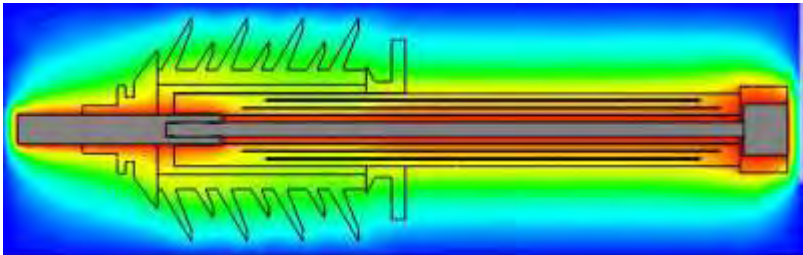
Pada bab ini akan dipaparkan hasil simulasi dan menganalisis hasil simulasi. Hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui perbandingan nilai distribusi medan pada tiap parameter yang dimodelkan.

4.1 Tegangan Kerja Bushing Trafo

Tegangan kerja yang digunakan pada bushing trafo ini sesuai dengan tegangan nominal bushing trafo, yaitu 24 KV.

Pada gambar 4.1 menunjukkan tegangan yang diberikan pada bushing tersebut. Tegangan 24 KV diberikan pada konduktor berwarna merah artinya tegangan mengalir penuh sebesar 24 KV sepanjang konduktor. Sedangkan di bagian isolatornya tegangan perlahan menurun menjadi berwarna biru dikarenakan fungsi isolasi tegangan dari isolator.

Sesuai dengan tujuan utama dari bushing tegangan yang mengalir pada konduktor mampu menghantarkan dari *head* sampai dengan bagian yang terhubung dengan trafo. Warna biru menandakan tegangan yang berada pada daerah tersebut semakin mengecil terutama pada bagian *mounting flange* yang berfungsi sebagai tempat terpasangnya bushing pada trafo. Dengan begitu *mounting flange* yang tidak bertegangan tidak akan menghantarkan tegangan pada *body* trafo.

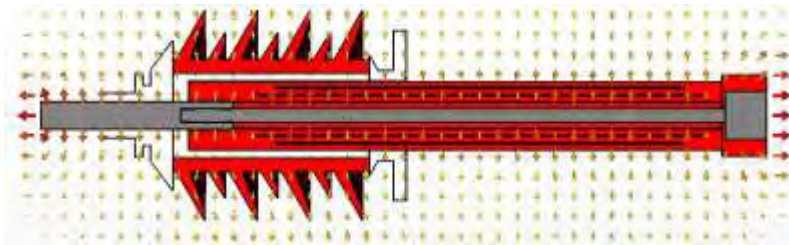


Gambar 4.1 Tegangan kerja bushing

4.2 Arah Distribusi Medan Listrik Bushing Trafo

Pada gambar 4.2, dapat dilihat arah distribusi medan mengalami penyebaran kesegala arah pada terutama konduktor yang dikenai tegangan. Dan disekitar bushing juga terdapat medan listrik dengan nilai

yang tidak begitu besar. Nilai medan listrik terbesar terdapat pada konduktor tersebut, yaitu sebesar 1.5133×10^3 KV/cm. kemudian mengalami penurunan pada bagian luar dari isolator dengan nilai medan listrik 0.25 KV/cm

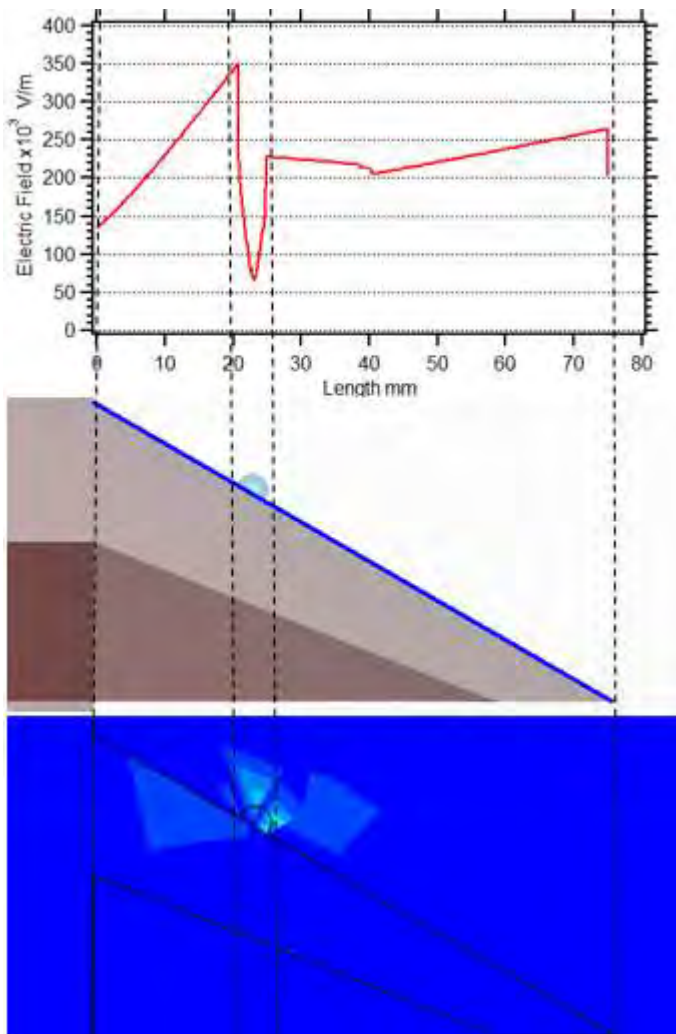


Gambar 4.2 Arah distribusi medan bushing

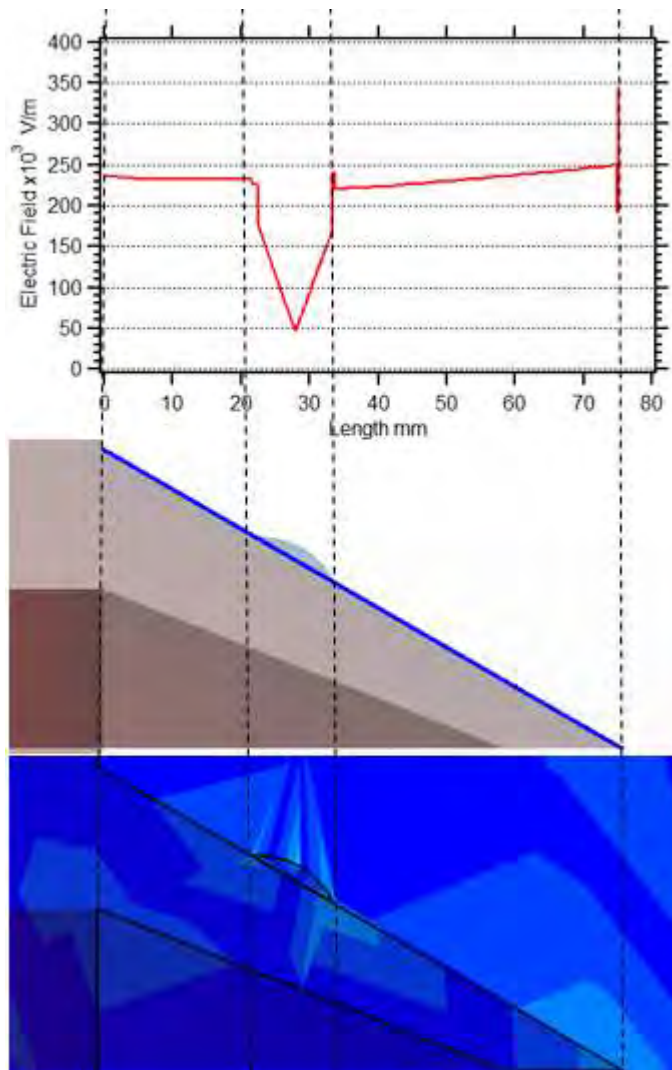
4.3 Pengaruh Pembentukan Sudut Pada Butir Air Terhadap Medan Listrik

Pada gambar 4.3 menunjukkan pengaruh sudut kontak terhadap nilai medan listrik. Besarnya sudut kontak yang terbentuk berpengaruh pada perubahan medan listrik yang di tunjukkan pada gambar (a) dan (b).

Sudut kontak menyebabkan proses *charging* pada titik persudutannya, sehingga nilai medan listrik mula-mula turun dan saat *discharging* nilai medan menjadi melonjak tinggi. Dan semakin besar sudut kontak maka semakin besar tinggi nilai medan listrik yang dihasilkan. Pada saat proses *discharging* pada bagian tepi sudut kontak adalah titik nilai medan listrik tertinggi. Kondisi terburuk ditunjukkan pada gambar (b) yaitu sudut kotak $< 90^\circ$.



(a) Sudut Kontak 90°



(b) Sudut Kontak 20°

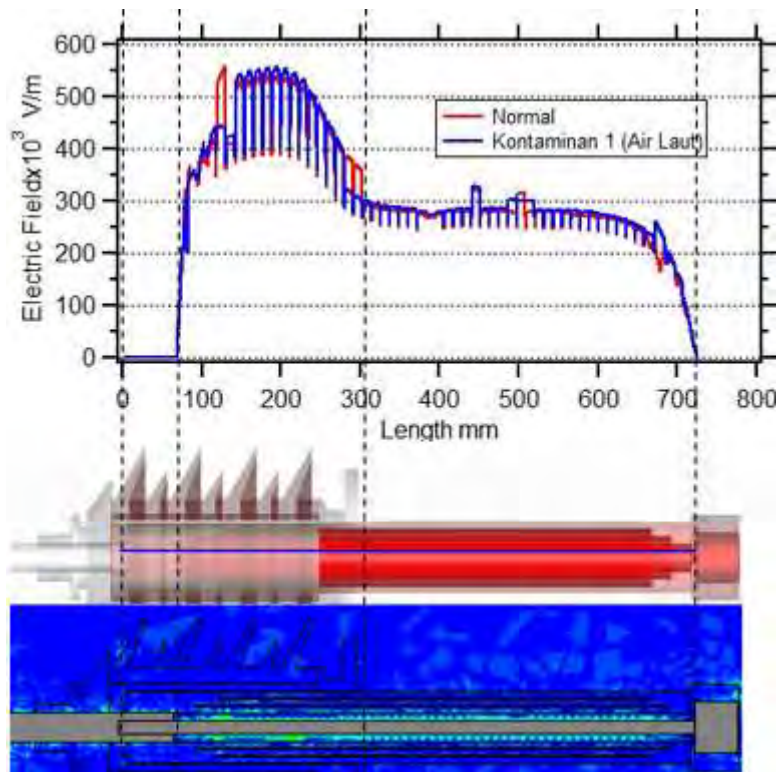
Gambar 4.3 Pengaruh sudut kontak terhadap nilai medan listrik

4.4 Perbandingan Medan listrik pada Bagian Bushing Trafo pada Kondisi Normal dengan Kondisi Terkontaminasi Air Laut dan Air Murni (*Distilled Water*)

Dalam bahasan ini, akan dilakukan pengamatan serta analisis medan listrik pada bagian dari bushing trafo. Akan dibandingkan nilai dalam kondisi normal dan dalam kondisi terkontaminasi. Nilai medan listrik yang diamati pada permodelan ini difokuskan pada tiga bagian, yaitu bagian batang inti (*Conductor*), permukaan isolator bagian bawah (*Resin Impregnated Paper*) dan Sirip pertama isolator bagian atas. Dengan jenis kontaminan yang diberikan memiliki 2 jenis, yaitu air laut (*sea water*) dan air murni (*distilled water*)

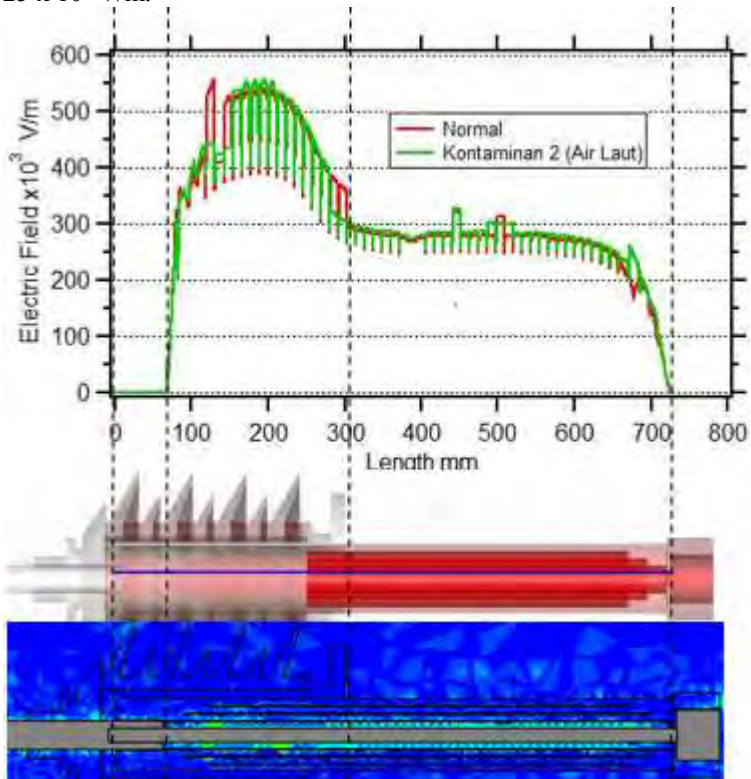
4.4.1 Perbandingan Medan Listrik Pada Batang Inti (*Core Rod*)

Dari gambar 4.4 menunjukkan perubahan yang diakibatkan oleh kontaminan 1 air laut yang terdapat pada sirip pertama isolator. Kontaminan 1 air laut menyebabkan kemampuan elektrik dari isolator berubah sehingga medan listrik pada batang inti mengalami ketidakseragaman yang dapat dilihat pada jarak ℓ_1 . Perubahan paling terlihat terjadi pada jarak 100 – 150 mm. Pada jarak ℓ_1 medan listrik yang isolatornya terdapat kontaminan turun lebih rendah dari kondisi normal, tapi setelah jarak ℓ_1 didapatkan medan listrik meningkat melebihi kondisi normal.



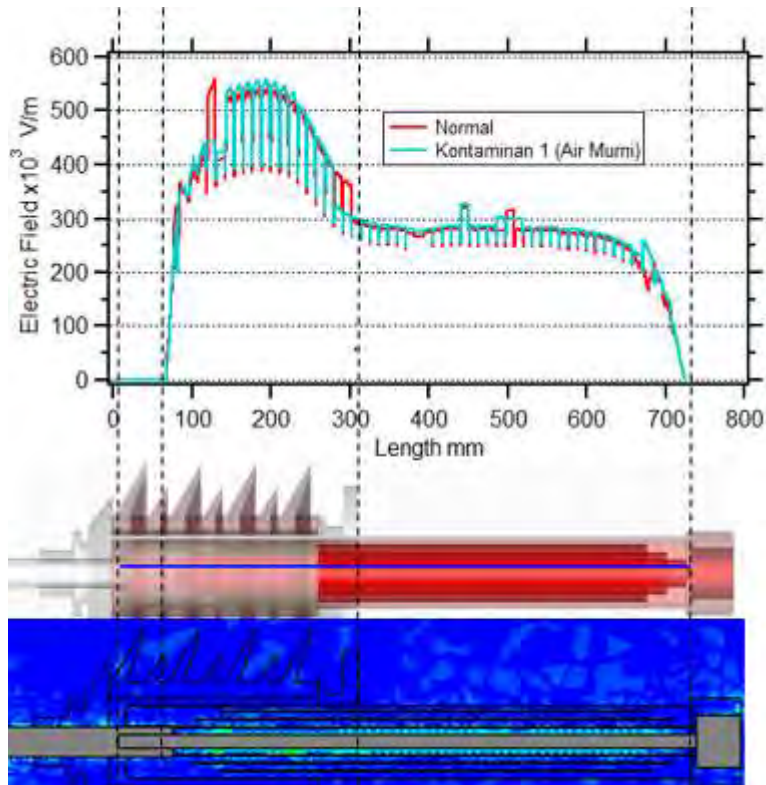
Gambar 4.4 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan 1 air laut

Pada gambar kurva 4.5 menunjukkan pengaruh kontaminan 2 air laut pada konduktor. Pengaruh yang diberikan oleh kontaminan 2 hampir sama dengan yang diberikan oleh kontaminan 1. Besarnya kenaikan rata-rata medan listrik pada daerah yang terpengaruh oleh kontaminan sebesar $25 \times 10^3 \text{ V/m}$.

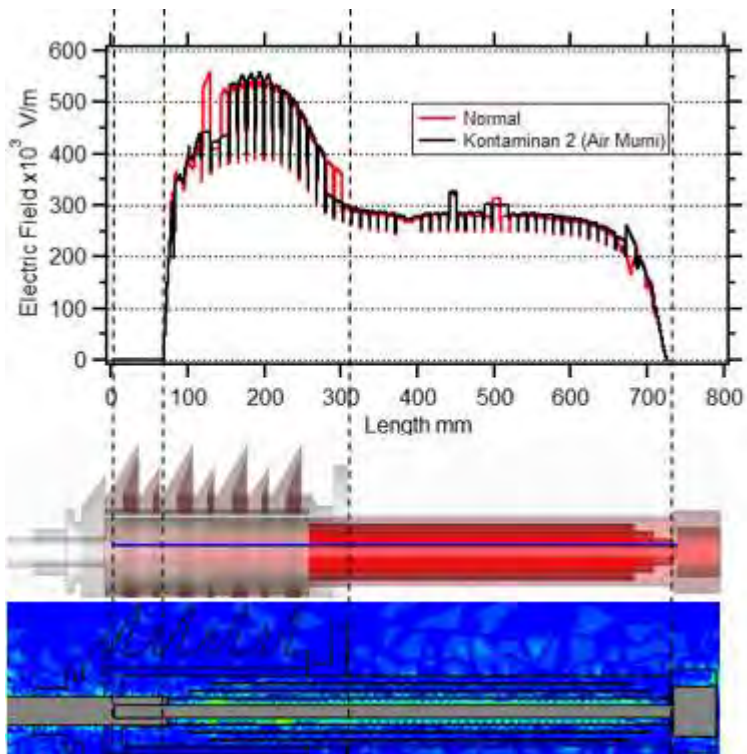


Gambar 4.5 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan II air laut

Pada gambar kurva 4.6 menunjukkan pengaruh sudut kontaminan 1 dan 2 dengan kontaminan air murni. Dari kurva terlihat bahwa pengaruh kontaminan air murni memberikan hasil yang tidak terlalu signifikan apabila dibandingkan dengan air laut. Medan listrik yang meningkat diakibatkan oleh kontaminan air murni besarnya sama dengan yang dihasilkan oleh kontaminan air laut.

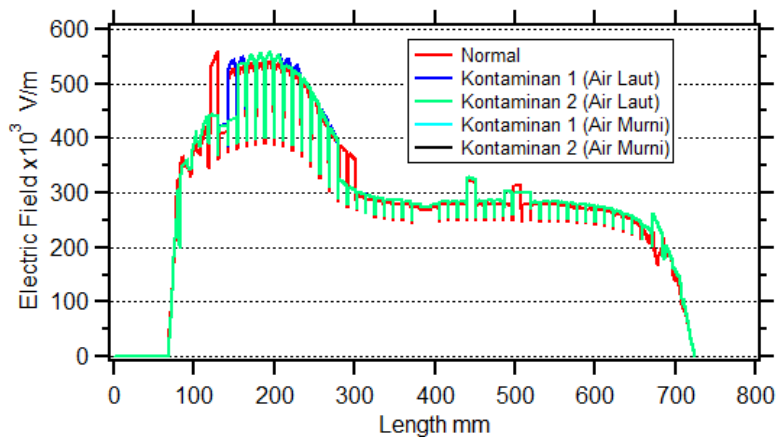


(a)



(b)

Gambar 4.6 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan air murni (*distilled water*) dengan (a) sudut kontaminan 1 dan (b) sudut kontaminan 2



Gambar 4.7 Perbandingan kondisi medan listrik pada batang inti

Dapat terlihat apabila dibandingkan antara kurva normal dan kurva yang terkena kontaminan perbedaan paling mencolok adalah pada jarak 100-150 mm dengan kurva yang terkena kontaminan nilainya lebih rendah daripada kondisi normal. Dan juga terlihat perbedaan diakibatkan oleh sudut kontaminan antara kontaminan 1 dan kontaminan 2. Dalam kurva terlihat pada jarak 150-300 mm kurva kontaminan 1 menunjukkan kenaikan daripada kondisi normal dan juga kondisi pada kontaminan 2.

Bahan daripada kontaminan tidak begitu mempengaruhi seperti yang terlihat pada perbandingan kurva diatas. Kontaminan 1 dan kontaminan 2 yang berbahan air murni (*distilled water*) tidak terlihat karena nilainya sama dengan besar kontaminan 1 dan kontaminan 2 yang berbahan air laut.

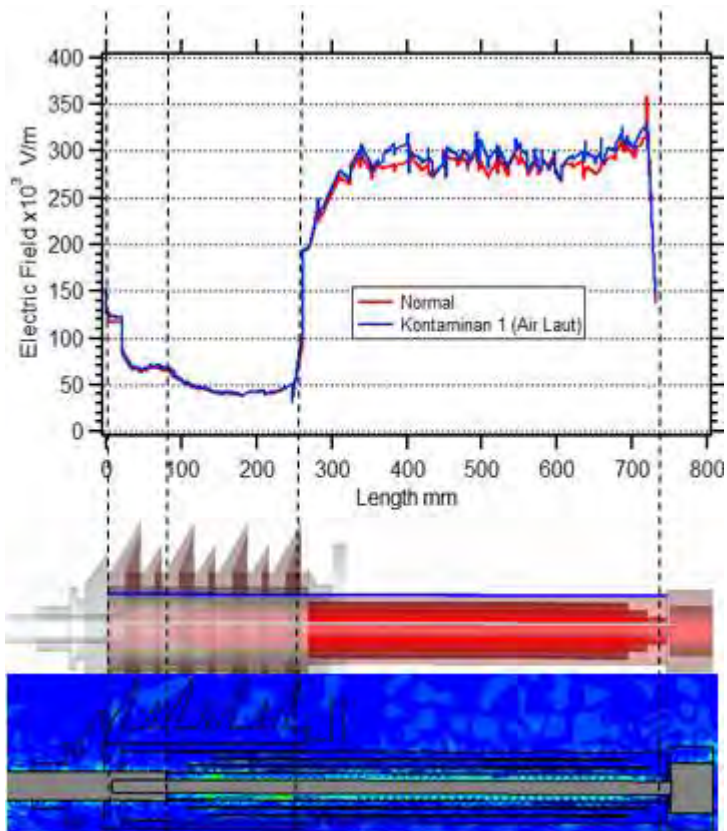
4.4.2 Perbandingan Medan Listrik Pada Permukaan *Resin Impregnated Paper*

Perbedaan medan listrik pada permukaan *resin impregnated paper* dapat diamati pada gambar 4.7. Nilai pengisian medan awal pada bushing yang terkena kontaminan 1 lebih tinggi dari pada bushing normal yaitu sebesar 150×10^3 V/m dan pada bushing normal sebesar 135×10^3 V/m. Perbedaan ini disebabkan kontaminan yang mempengaruhi konduktor dari bushing sehingga bagian isolator yang menyelimuti konduktor ikut terpengaruh. Perbedaan ini sangat terlihat

pada jarak 270-725 mm. Pada jarak tersebut bushing yang terkena kontaminan 1 lebih tinggi nilai medan listriknya dibandingkan dengan bushing normal.

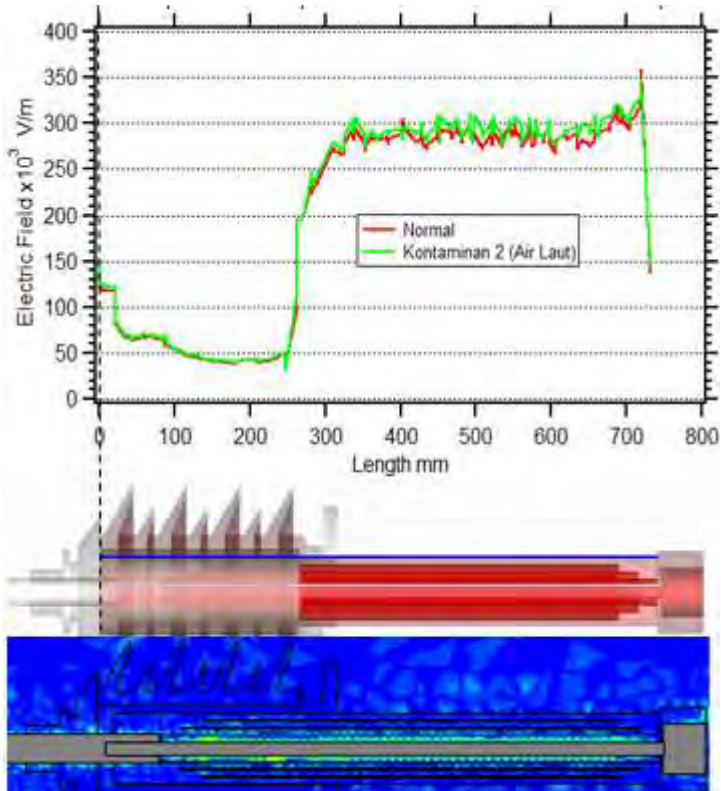
Pada jarak 0-270 mm nilai medan listrik pada permukaan *resin impregnated paper* rendah, ini dikarenakan permukaan *resin impregnated paper* masih terlindungi oleh isolasi lain yang berada di luarnya yang berbahan porselen. Pada jarak 270-725 mm permukaan *resin impregnated paper* tidak lagi terlindungi oleh isolasi lain sehingga melonjak sampai 300×10^3 V/m setelah itu medan listrik naik turun secara stabil.

Penurunan medan listrik yang drastis terjadi pada jarak 700 – 731 mm dari 359×10^3 V/m menurun sampai sebesar 140×10^3 V/m. Ini dipengaruhi oleh transisi antar bahan karena pada jarak ini bahan *resin impregnated paper* mendekati bagian *electric shield* yang berbahan porselen.



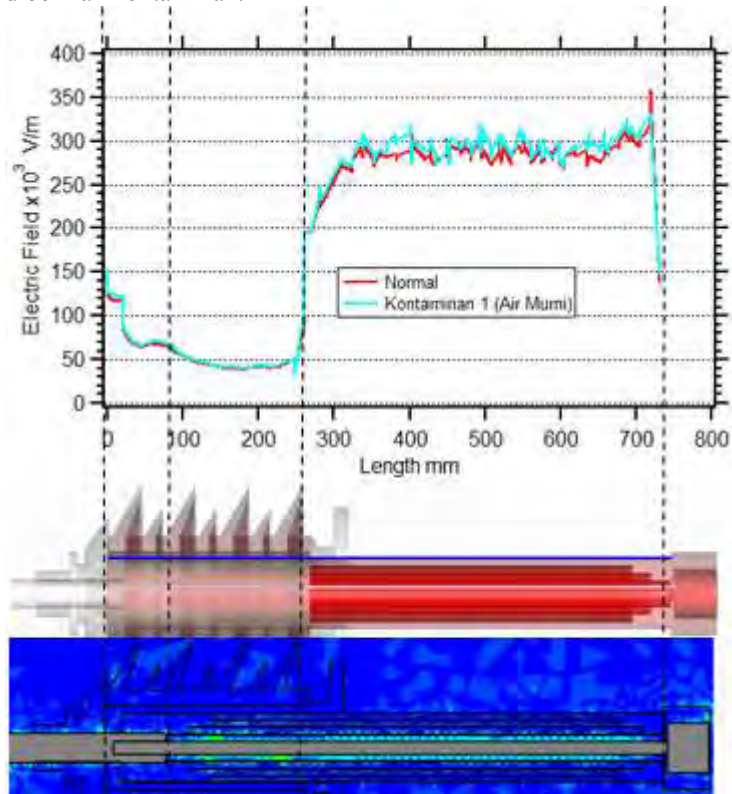
Gambar 4.8 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan *resin impregnated paper* dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan I air laut

Pada gambar kurva 4.8 menunjukkan pengaruh kontaminan 2 yang berupa air laut pada permukaan *resin impregnated paper*. Kontaminan 2 menyebabkan menurunnya sifat dielektris isolator, sehingga medan listrik pada *resin impregnated paper* lebih tinggi dari nilai normal. Mulai pada jarak 200 – 700 mm medan listrik mengalami kenaikan sebesar 15×10^3 V/m dibandingkan dengan kondisi medan saat normal. Perbedaan dengan pemberian kontaminan 1 dapat terlihat pada jarak 300 – 400 mm. Pada kontaminan 1 medan listrik pada jarak tersebut meningkat melebihi normal sedangkan pada pemberian kontaminan 2 medan listrik menurun lebih rendah dari normal.

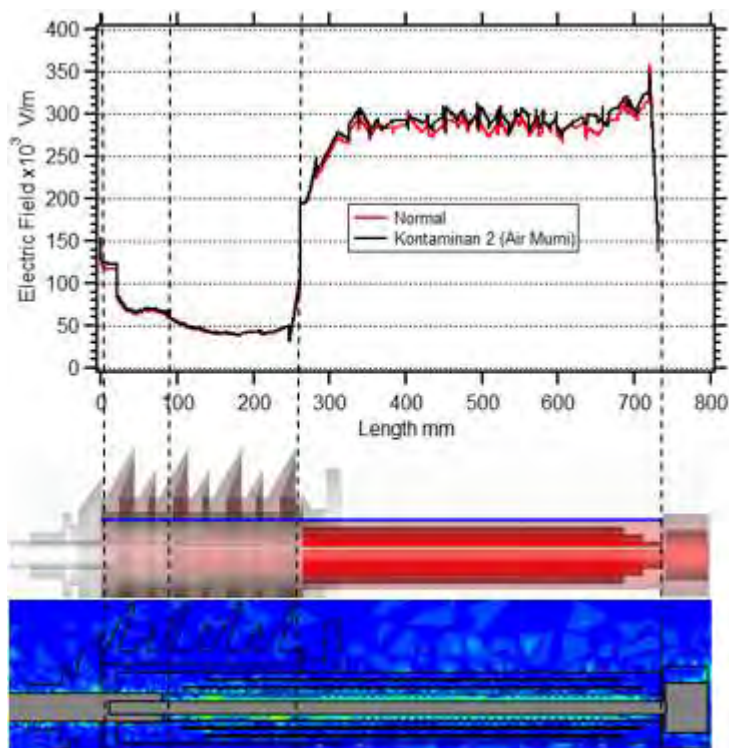


Gambar 4.9 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan *resin impregnated paper* dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan II air laut.

Pada gambar 4.9 dan 4.10 dapat dilihat pengaruh kontaminan air murni pada medan listrik pada isolator berbahan *resin impregnated paper*. Nilai medan listrik isolator yang diberikan kontaminan air murni tidak terlalu berbeda jauh nilainya dengan nilai pada medan listrik yang dipengaruhi oleh kontaminan air laut. Perbedaan hanya dapat terlihat pengaruhnya oleh pemberian sudut kontak pada permukaan yang diberikan kontaminan.

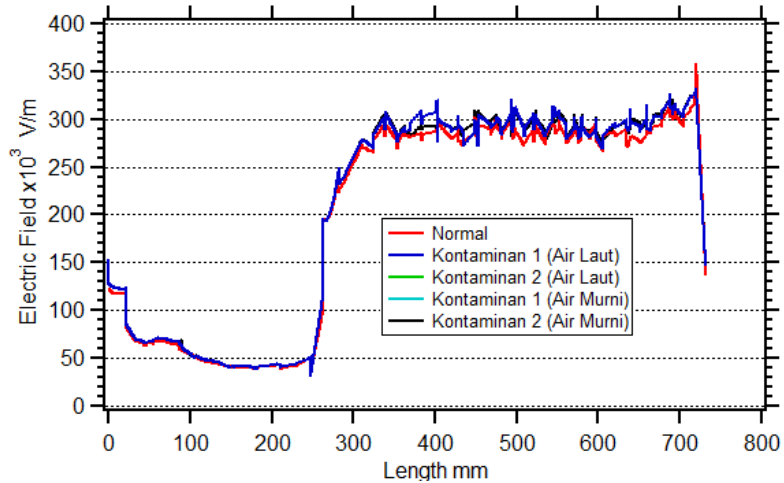


Gambar 4.10 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan *resin impregnated paper* dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan I air murni



Gambar 4.11 Perbandingan medan listrik pada bagian permukaan *resin impregnated paper* dengan kondisi normal dan kondisi kontaminan II air murni

Perbandingan nilai medan listrik normal dengan kontaminan 1, kontaminan 2 dengan bahan air laut dan kontaminan 1, kontaminan 2 dengan bahan air murni dapat dilihat pada gambar 4.11, dari kurva tersebut dapat terlihat kontaminan air murni tidak terlihat jelas karena besarnya sama dengan kontaminan air laut.



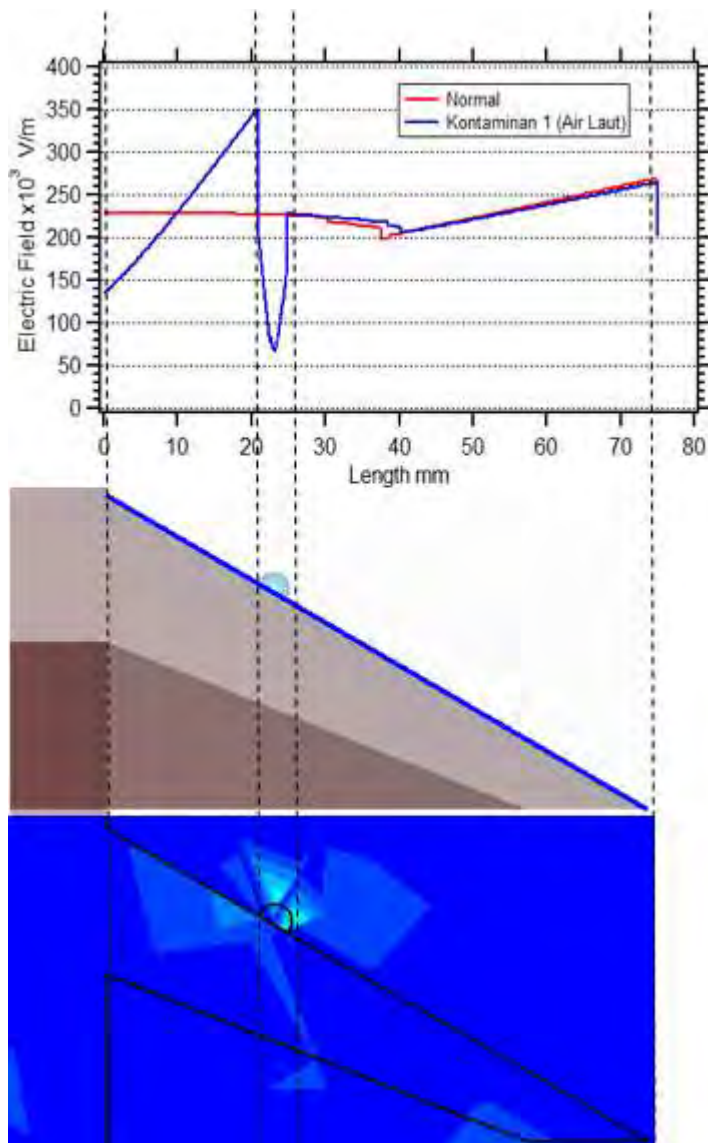
Gambar 4.12 Perbandingan kondisi medan listrik pada permukaan *resin impregnated paper*

4.4.3 Perbandingan Medan Listrik Pada Sirip Pertama Isolator Porselen

Pada gambar 4.12 merupakan kondisi medan listrik pada saat diberikan kontaminan 1 yang berupa air laut dengan sudut kontak sebesar 90 derajat yang berada pada jarak ℓ_1 . Nilai medan listrik awal langsung mengalami kenaikan karena butiran air laut mempengaruhi medan listrik di sekitar isolator pada jarak 21 mm yaitu pada ujung awal sirip pertama sehingga menyebabkan peningkatan yang drastis dengan nilai medan listrik mencapai 350×10^3 V/m pada ujung awal dari butiran air laut.

Besarnya medan listrik pada ujung awal dari butiran air laut itu adalah titik persinggungan dari tiga jenis dielektrik bertemu yaitu air, gas dan permukaan porselen sehingga medan listrik yang terjadi pada titik persinggungan ini amat besar. Peningkatan medan listrik juga tergantung pada besarnya sudut kontak yang tercipta oleh butiran air.

Peningkatan drastis tersebut berhenti pada ujung dari butiran air laut. Kemudian medan mengalami penurunan pada bagian yang terdapat butiran air terutama pada bagian tengah dari butiran air laut. Ini diakibatkan karena potensial listrik yang terjebak oleh butiran air laut menurunkan besarnya medan listrik pada daerah tersebut. Pada bagian tengah dari butiran air laut medan listrik berada di nilai paling rendah yaitu sebesar 70×10^3 V/m. Pada ujung akhir dari butiran air laut medan listrik meningkat kembali seperti kondisi normal.



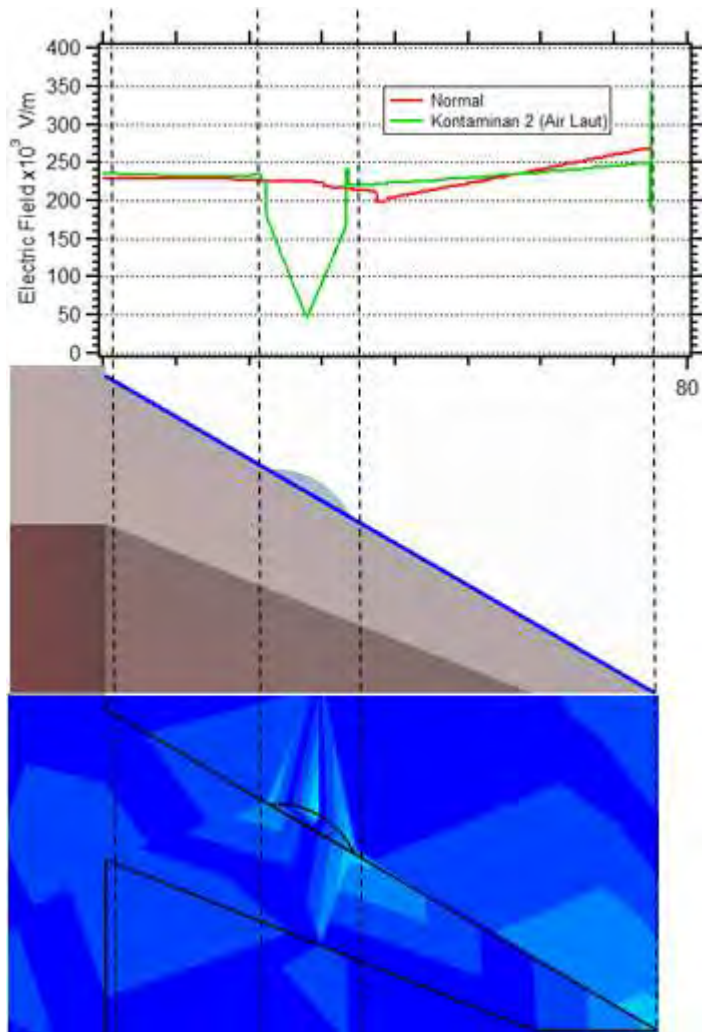
Gambar 4.13 Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 1 air laut pada sirip pertama isolator

Pada gambar 4.13 menunjukkan pengaruh sudut kontaminan 2 yang berupa air laut dengan sudut kontak sebesar 45 derajat terhadap kondisi medan listrik pada sirip pertama isolator porselen. Medan listrik pada kurva ditunjukkan *charging* awal yang lebih tinggi daripada normal sebesar 10×10^3 V/m. Pada jarak ℓ_1 menunjukkan penurunan yang drastis

diakibatkan oleh butiran air laut kontaminan 2. Pada bushing yang diberikan kontaminan 2 tidak terdapat kenaikan drastis yang diakibatkan oleh pengaruh butiran air seperti yang terjadi pada kontaminan 1. Medan listrik tidak terpengaruh besar pada saat sebelum terkena butiran air. Hanya saja besarnya medan listrik sedikit lebih dari normal tetapi tetap stabil. Pada saat terkena ujung dari butiran air medan listrik menurun sampai dengan sebesar 50×10^3 V/m.

Hubungan antara besarnya nilai medan listrik dan jari-jari dari butiran air laut dapat terlihat pada kurva pada gambar 4.13. Pada gambar 4.13 jarak medan listrik yang menurun diakibatkan oleh butiran air lebih besar jika dibandingkan dengan kontaminan 1. Ini diakibatkan lebih banyaknya distribusi potensial listrik yang terjebak oleh butiran air laut dikarenakan volume dari butiran air yang membesar karena jari-jari butiran air laut yang lebih besar daripada kontaminan 1.

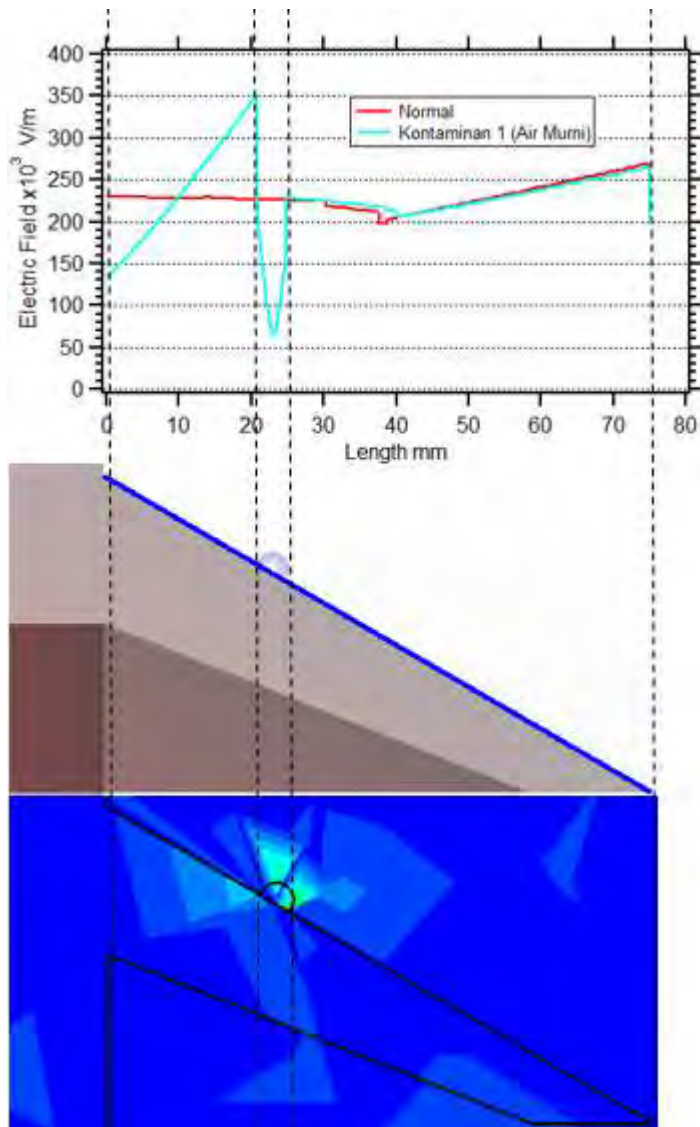
Medan listrik yang terdapat pada butiran air laut perlahan meningkat saat mendekati ujung dari butir air. Pada ujung butiran air laut medan listrik meningkat sebesar 30×10^3 V/m dari medan normal. Ini dipengaruhi oleh besarnya sudut kontak pada butir air kontaminan. Semakin besar sudut kontak yang diberikan maka makin besar peningkatan medan listrik pada ujung akhir dari butir air kontaminan. Dan itu hanya terjadi seketika setelah itu nilai medan listrik mendekati nilai normal kembali.



Gambar 4.14 Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 2 air laut pada sirip pertama isolator

Pada gambar kurva 4.14 menunjukkan pengaruh kontaminan 1 dengan bahan air murni pada sirip pertama isolator bushing. Kontaminan 1 menyebabkan kemampuan dielektrik menjadi berubah sehingga medan listrik mengalami ketidak seragaman pada jarak 0-40 mm. pada jarak tersebut terlihat perbedaan pada awalan dikarenakan proses *charging* yang diakibatkan adanya kontaminan di permukaan isolator. Proses tersebut membuat medan listrik yang terdapat pada ujung isolator lebih rendah daripada kondisi normal dengan nilai 150×10^3 V/m yang selanjutnya meningkat secara tajam mendekati nilai 350×10^3 V/m pada saat mendekati kontaminan 1.

Penurunan terjadi pada medan listrik yang terdapat pada kontaminan. Medan listrik menurun sampai titik terendahnya pada titik 23 mm dengan nilai sebesar 60×10^3 V/m. Setelah itu medan listrik meningkat dengan drastis sampai mendekati kondisi medan listrik normal.

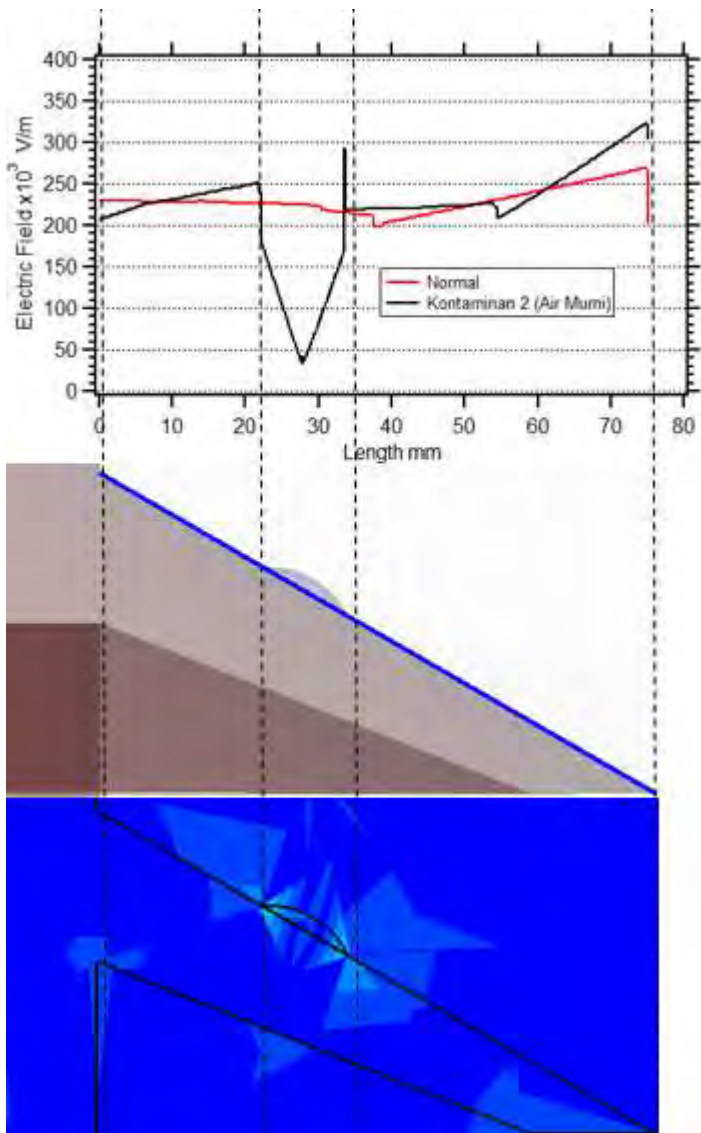


Gambar 4.15 Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 1 air murni pada sirip pertama isolator

Pada gambar kurva 4.15 menunjukkan pengaruh kontaminan 2 air murni pada sirip pertama isolator bushing. Pada ujung awal isolator medan listrik besarnya lebih rendah daripada nilai normal sebesar 200×10^3 V/m. Tapi apabila dibandingkan dengan kontaminan 1 air murni *charging* yang terjadi pada sirip isolator bushing yang dipengaruhi kontaminan 1 air murni menunjukkan nilai yang lebih rendah sebesar 150×10^3 V/m.

Perbedaan yang terlihat jelas terjadi pada jarak ℓ_1 dimana terlihat medan listrik menurun sampai dengan nilai sebesar 48×10^3 V/m. Penurunan medan listrik yang diakibatkan oleh potensial yang terjebak pada butiran air. Sehingga besarnya nilai medan listrik yang terdapat pada butiran air jauh lebih rendah dari nilai normal.

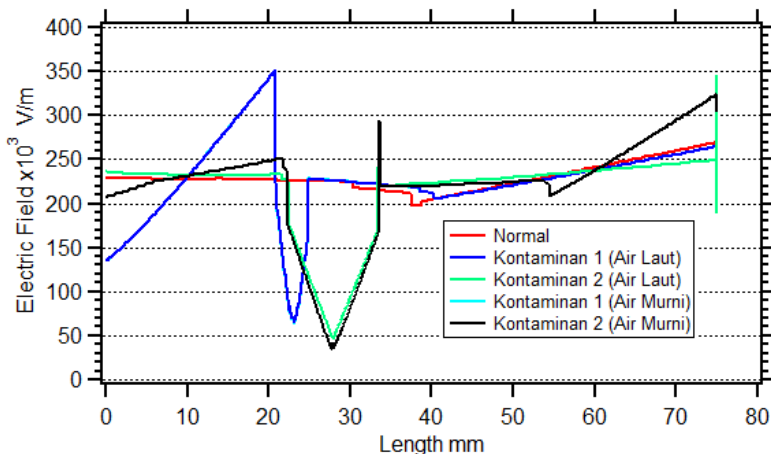
Nilai medan listrik pada isolator yang dipengaruhi kontaminan 2 juga kembali meningkat lebih besar dari nilai pada kondisi normal yang terjadi pada jarak 55-75 mm. Yang berarti peningkatan medan listrik ini terjadi di ujung akhir dari sirip isolator bushing. Dimana secara teori pada sudut akan lebih banyak medan listrik yang terkumpul. Oleh karena itu pada setiap akhir ujung dari sirip isolator bushing medan listriknya lebih besar.



Gambar 4.16 Perbandingan kondisi medan listrik saat kondisi normal dan terdapat kontaminan 2 air murni pada sirip pertama isolator

Dari perbandingan kurva dapat terlihat perbedaan bahan kontaminan antara air laut dan air murni tidak terlalu berpengaruh pada medan listrik kontaminan 1. Sedangkan pada kontaminan 2 terlihat pengaruh pada perbedaan bahan kontaminan. Pada kontaminan 2 yang berbahan air laut *charging* medan listrik awalnya sedikit lebih tinggi daripada normal sedangkan pada kontaminan 2 yang berbahan air murni *charging* medan listrik awalnya lebih rendah daripada normal.

Perbedaan juga dapat terlihat pada titik medan listrik yang terletak pada butiran air. Dari kurva dapat terlihat nilai medan listrik dari isolator yang terkena kontaminan 2 air murni lebih rendah daripada nilai medan listrik pada isolator yang terkena kontaminan 2 air laut dengan nilai sebesar $48 \times 10^3 \text{ V/m}$.

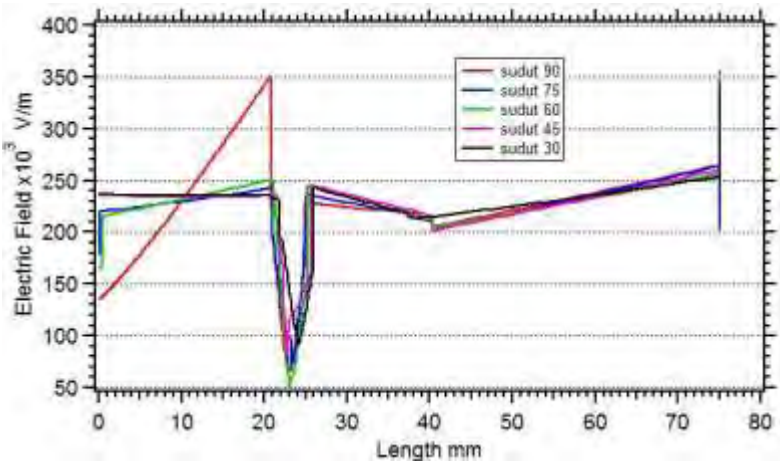


Gambar 4.17 Perbandingan kondisi medan listrik pada sirip pertama isolator bushing trafo

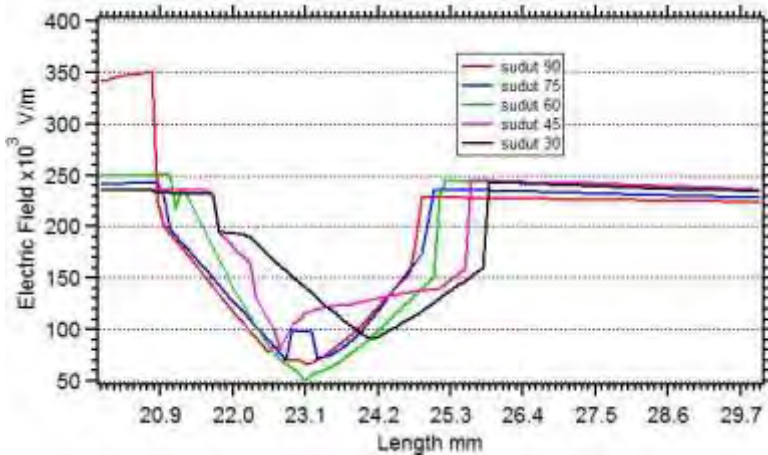
4.4.4 Perbandingan Medan Listrik Pada Sirip Pertama dengan Perbedaan Sudut Kontak Butir Air

Pada gambar 4.18 merupakan kondisi medan listrik pada saat diberikan sudut kontak yang berbeda beda. Perubahan sudut kontak yang diberikan dengan peningkatan sebesar 15° , dimulai dari sudut 30° , 45° , 60° , 75° , dan 90° . Perbandingan ini dilakukan untuk melihat tren perubahan dari medan listrik pada sirip pertama isolator porselen apabila sudut kontak dari butir air kontaminan dirubah dengan kondisi variable lainnya tetap. Sudut dengan medan listrik terendah yang dihasilkan oleh

butir kontaminan adalah sudut 60° yaitu sebesar $48 \times 10^3 \text{ V/m}$. Sedangkan kenaikan charging awal tertinggi pada sirip pertama isolator sebelum terkena kontaminan butir air laut adalah sudut 90° dengan peningkatan mencapai $350 \times 10^3 \text{ V/m}$.



Gambar 4.18 Perbandingan kondisi medan listrik pada sirip pertama isolator bushing trafo dengan perubahan sudut kontak butir air kontaminan



Gambar 4.19 Perbesaran kurva pada jarak 20-30 mm

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi distribusi medan listrik pada bushing trafo dengan tipe *resin impregnated paper* adalah sebagai berikut:

1. Pada simulasi distribusi medan listrik pada bushing trafo, perbandingan pengaruh kontaminan 1, kontaminan 2 terhadap medan listrik pada tiap bagian yang diamati dapat disimpulkan :
 - (a) Batang inti (*Core*)

Pengaruh kontaminan 1, kontaminan 2 dan tidak terlalu besar terhadap nilai medan listrik pada batang inti kondisi normal. Perbedaan yang terjadi pada saat batang inti mendekat sirip kedua isolator. Medan listrik pada kondisi normal sebenarnya meningkat tinggi. Tetapi karena pengaruh kontaminan yang berada pada sirip isolator pertama medan listrik pada daerah tersebut tidak meningkat. Perbedaan yang dipengaruhi oleh sudut kontak, dan juga pengaruh perbedaan material kontaminan air laut dan air murni (*distilled water*) juga tidak terlalu besar
 - (b) Permukaan *resin-impregnated paper*

Pengaruh kontaminan 1 dan 2 tidak berbeda jauh terhadap nilai medan listrik pada *resin impregnated paper* pada kondisi normal. Pada saat awal pengisian medan listrik masih rendah karena teredam oleh isolator yang berada menyelimuti permukaan *resin impregnated paper*. Perbedaan yang mencolok antara medan listrik saat kondisi normal dan saat dikenai kontaminan 1 dan 2 terjadi setelah melewati sirip-sirip isolator. Butir air menyebabkan medan listrik menjadi tidak seragam, sehingga terjadi kenaikan bila dibandingkan kondisi normal. Kenaikan dan penurunan medan listrik dikarenakan proses *charging* pada bagian sudut kontak yang dibentuk oleh butir air.
 - (c) Sirip pertama isolator porselen pada bushing
Pengaruh kontaminan 1 dan 2 berbeda jauh terhadap nilai medan listrik pada permukaan sirip pertama isolator porselen pada kondisi normal. Pada kontaminan 1 pengisian awal

medan listrik langsung meningkat tinggi diakibatkan oleh sudut kontak kontaminan 1 yang sebesar 90 derajat. Sehingga lonjakan medan listrik pada ujung awal butir air diakibatkan oleh besarnya sudut kontak butir air. Setelah itu medan listrik menurun ke titik terendahnya sebelum meningkat lagi ke kondisi normal. Pada kontaminan 2 pengisian awal medan listrik tidak langsung meningkat tinggi tetapi pada saat mengenai butir air laut medan listriknya perlahan turun ke titik terendah sebelum naik kembali pada kondisi normal.

Pengaruh perbedaan material air laut terlihat pada kontaminan 1. Pada kontaminan 1 yang berupa air laut *charging* awal medan listriknya langsung meninggi sedangkan pada kontaminan 1 yang berupa air murni *charging* awal tidak langsung melonjak tinggi.

5.2 Saran

Pembentukan element segitiga (*mesh*) masih belum sempurna, sehingga berpengaruh pada nilai medan listrik yang dihasilkan. Untuk studi selanjutnya dapat menyempurnakan pembentukan *mesh* agar nilai medan listrik sesuai dengan kondisi asli.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bonggas L. Tobing, *“Peralatan Tegangan Tinggi”*, PT. Gramedia, 2003.
- [2] Naidu, M.S dan V. Kamaraju, *“High Voltage Engineering Second Edition”*, McGraw Hill, New Delhi. 1996.
- [3] James H. Harlow, *“Electric Power Transformer Engineering”*, CRC Press, 2007
- [4] A. Krivda, V.Tilliette, J.Rocks, H.Hillborg, O.Hjortstam, L.Ritzer, and P.Meier, *“High Voltage Bushing”*, U.S. Patent US 2008179077 A1, July, 31, 2008.
- [5] *“Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions”*, IEC Standards 815,1986
- [6] Rustam Effendi, Slamet Syamsudin, Wilson Sinambela dan Soemarto, *“Medan Elektromagnetika Terapan”*, Erlangga, 2007.
- [7] S.Feier-Iova and V.Hinrichsen, *“Prediction of Partial Discharges at Water Drops on Insulating Surfaces Stressed by Electrical Field”*, Germany, 2009.
- [8] I Made Yulistya Negara, *“Teknik Tegangan Tinggi Prinsip dan Aplikasi Praktis”*, Graha Ilmu, 2013
- [9] Andrew R. Hileman, *“Insulation Coordination for Power System”*, Taylor & Francis, London, 1999.
- [10] Waluyo, Parouli M. Pakpahan, Suwarno, *“Influences of Water Droplet Size and Contact Angle On the Electric Field and Potential Distributions On An Insulator Surface”*, Institut Teknologi Bandung, 2006.
- [11] Catalogue ABB, *“Micafil-Oil Outdoor Bushings with Porcelain Insulator”*, ABB, Switzerland.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Reza Yogatama, lahir di Jakarta, 30 Maret 1992. Riwayat pendidikan penulis, SDI Bani Saleh 2 Bekasi (lulus 2004) , lulus pendidikan SMP tahun 2007 di SMP Islam Al-Azhar 8 Kemang Pratama, Bekasi. Tahun 2010 lulus dari SMAN 2 Bekasi. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2010. Selama kuliah, penulis aktif di organisasi pencinta alam KALPATARU. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan fokus pada studi mengenai bushing transformator. Penulis dapat dihubungi melalui email reza.yogatama@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan